

VŠB - Technická universita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Řešení aktivní aerodynamiky závodního automobilu

Active aerodynamics of racing car

Student: Jan Sikora

Vedoucí bakalářské práce: Ing. et Ing. Michal Richtář, Ph.D.

Zadání bakalářské práce

Student:

Jan Sikora

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2301R003 Dopravní technika a technologie

Téma:

Řešení aktivní aerodynamiky závodního automobilu
Active Aerodynamics of Racing Car

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce návrh řešení aktivní aerodynamiky závodního automobilu.

Postup řešení:

1. Úvod.
2. Legislativní rámec, vliv pravidel FSAE.
3. Teoretický rozbor problému - aerodynamika a její vliv na jízdu.
4. Rešerše řešení aktivní aerodynamiky.
5. Návrh vlastního technického řešení.
6. Zhodnocení a doporučení.
7. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOZUBKOVÁ, Milada. Modelování proudění tekutin. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická Univerzita, 2008, 140s.

MATĚJKA, R. Vozidla silniční dopravy I.2. vydání. Bratislava: Alfa, 1990. 224 s. ISBN 80-05-00392-7.

VLK, F. Dynamika motorových vozidel.2. vydání. Brno: VLK, 2003. 432 s. ISBN 80-293-0024-2.

DRÁBKOVÁ, S. Mechanika tekutin[online].Ostrava: Ediční středisko VŠB –TUO, 2007. 257 s. ISBN 978-80-248-1508-4 [vid. 15.12.2013]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>.

KOVANDA Bohuslav, KOVANDA Jan.Aerodynamika vozidel. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 800101942x.

KATZ, Joseph.Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995, viii, 270 p. ISBN 0837601428.

JANALÍK, Jaroslav. Obtékání a odpor těles [online]. Ostrava: VŠB-TU, 2008 [cit. 2014-01-05]. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>.

HUCHO, Wolf-Heinrich.Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. 4th ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c1998, xix, 918 p. ISBN 0768000297.pdf.

MILLIKEN, Douglas L., and William F. MILLIKEN. Race Car Vehicle Dynamics: Problems, Answers, and Experiments. Warrendale, PA: SAE International, 2003.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Richtář, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



prof. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18.5.2020



.....
Jan Sikora

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské*) práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.



V Ostravě dne 18.5.2020

.....
Jan Sikora

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SIKORA, J. *Řešení aktivní aerodynamiky závodního automobilu: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2020, 41s. Vedoucí práce: RICHTÁŘ, M.

Bakalářská práce se zabývá realizací aktivní aerodynamiky na monopostu studentského týmu TU-Ostrava. Úvodní část práce se věnuje výňatku z pravidel pro konstrukci studentské formule dle FSAE a klíčovým poznatkům z dynamiky vozidel. Na základě srovnání jednotlivých možností realizace aktivní aerodynamiky je vybrána optimální varianta, které se dále věnuje praktická část. Praktická část je pojata jako návrh jednoho z možných řešení aktivní aerodynamiky a jsou v ní zahrnuty veškeré klíčové výpočty.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SIKORA, J. *Active aerodynamics of racing car: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of transport, 2020, 41p. Thesis head: RICHTÁŘ, M.

Bachelor thesis is dealing with active aerodynamics of racing car on formula student monopost. The introduction is treating with FSAE rules which are important for constructing formula student monopost and dynamics of vehicles. The optimal variant is chosen by comparison of all possible variants. Practical part is presenting and calculating chosen optimal mechanism of active aerodynamics.

Obsah

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod..... | 8 |
| 2 | Pravidla FSAE..... | 9 |
| 2.1 | Obecná technická pravidla | 9 |
| 2.2 | Umístění Aerodynamických zařízení | 10 |
| 2.3 | Elektrická výbava..... | 12 |
| 3 | Aerodynamika a její vliv na jízdu..... | 13 |
| 3.1 | Základní pojmy | 13 |
| 3.2 | Jízdní odpory | 17 |
| 3.3 | Pohybová rovnice vozidel | 21 |
| 4 | Rešerše aktivní aerodynamiky | 23 |
| 4.1 | Historie aerodynamiky v motorsportu..... | 23 |
| 4.2 | Aerodynamika dnes..... | 24 |
| 4.3 | Aerodynamické prvky a zařízení..... | 25 |
| 5 | Návrh vlastního technického řešení..... | 27 |
| 5.1 | Varianty řešení ovládání aerodynamických zařízení..... | 27 |
| 5.2 | Výběr varianty | 28 |
| 5.3 | Popis komponentů a funkce systému | 29 |
| 5.4 | Popis konstrukce | 30 |
| 5.5 | Výpočet zatěžující síly | 31 |
| 5.6 | Výpočet momentu působící na profil křídla..... | 34 |
| 5.7 | Kontrola na smyk a otláčení..... | 35 |
| 6 | Závěr..... | 39 |
| | Použitá literatura | 40 |
| | Seznam příloh | 41 |

1 Úvod

Aerodynamika je věda, která se zabývá tokem média a interakcí s objekty, jako například karosérie osobního vozu. Největšího významu má v odvětví automobilismu, letectví a architektuře.

V automobilovém odvětví lze považovat za jednoho z největších průkopníků Hanze Ledwinka, který představil roku 1934 první sériově vyráběné osobní vozidlo (Tatra77) s aerodynamickou karosérií. Tento model, díky své aerodynamické karosérii, dosahoval větší maximální rychlosti při nižším výkonu, než měly tehdejší vozy. Od té doby je největší snahou výrobců automobilů navrhovat karoserie s pokud možno, co nejmenším odporem vzduchu. K dosažení tohoto požadavku lze přispět i použitím tzv. aktivní (proměnlivé) aerodynamiky.

V případě použití proměnlivé aerodynamiky lze účinně měnit provozní hodnoty vozidla za jízdy. Díky těmto systémům lze dosáhnout například nižší spotřeby spalovacího motoru nebo také zvýšení přítlaku například závodního vozidla. Opatření a optimální využívání aktivní aerodynamiky na závodních vozidlech může vést až k dosažení lepších výsledků na závodních okruzích.

Bakalářská práce se zabývá řešením systému aktivní aerodynamiky na studentské formuli. V její první části jsou zmíněna klíčová pravidla pro návrh aerodynamických zařízení, v následující části jsou shrnuty základní pojmy z aerodynamiky a popis odporů při pohybu vozidla. Praktická část se zabývá výběrem metody ovládání aerodynamických zařízení na základě rešerše řešení v praxi, popisem funkce zařízení, popisem komponent a technického řešení. Poslední část je pak věnovaná výpočtům zatěžující síly a minimálních rozměrů konstrukce.

2 Pravidla FSAE

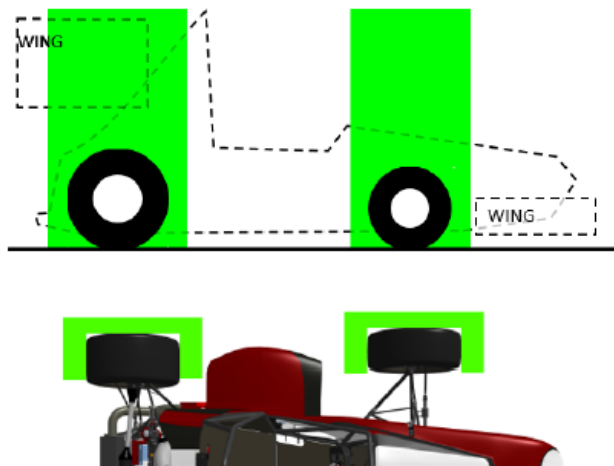
Klíčovými pravidly pro technický návrh formule student jsou pravidla SAE a FSG, která se každým rokem upravují a jsou dostupná v plném znění na oficiálních webových stránkách pořadatele. Pro navrhovanou konstrukci stanovují omezující podmínky v oblasti technických pravidel, umístění aerodynamických zařízení a elektrické vybavy.

2.1 Obecná technická pravidla

Obecná technická pravidla stanovují maximální rozměry aerodynamických zařízení, umístění aerodynamického zařízení na formuli a požadavky na ně kladené.

T.1.1.1 Vozidlo musí být typu s otevřenými koly a otevřeným kokpitem (styl formule).

T.1.1.2.c Půdorysný volný prostor kolem kol musí být 75 mm od každé strany kola, předních i zadních.



Obrázek 2.1 - Vymezení prostoru pro volný pohyb kol monopostu [4].

T.9.1.1 Karoserie musí být v přední části celistvá bez otvorů, které by mohly ohrozit pilota, výjimku ukládají pouze malé otvory potřebné k vedení prvků zavěšení.

- T.9.1.3** Všechny aerodynamické prvky karoserie, které by mohly přijít do kontaktu s člověkem či blíže určeným objektem, musí mít minimální rádius 5 mm pro horizontální hrany a 3 mm pro vertikální hrany.
- T.9.2.1** Aerodynamické zařízení je veškerý prvek vozidla, kolem kterého obtéká médium a generuje přítlak.
- T.9.2.2** Monopost nesmí obsahovat výkonné zařízení ovlivňující aerodynamické jevy mezi podvozkem vozidla a zemí.
- T.9.2.3** Všechna aerodynamická zařízení musí být navržena tak, aby nevykazovala jakýkoliv samovolný neřízený pohyb.

2.2 Umístění Aerodynamických zařízení

T.9.3 Přední část

T.9.3.1 Podle plánu musí být jakákoli část aerodynamického zařízení:

- a.** Nejvýše 700 mm před předními pneumatikami.
- b.** Ve svislé rovině rovnoběžné se střednicí podvozku dotýkající se vnější strany předních pneumatik ve výšce náboje.

T.9.3.2 Při pohledu zepředu na vozidlo musí být část předních kol / pneumatik, která je více než 250 mm nad vozovkou, při měření bez řidiče ve vozidle bez překážek.

T.9.4 Zadní část

T.9.4.1 Podle plánu musí být jakákoli část aerodynamického zařízení:

- a.** Ne více než 250 mm vzad zadních pneumatik.
- b.** Ne dále vpřed než do svislé roviny přes zadní část přední strany opěrky hlavy řidiče, s výjimkou případné vycpávky, nastavené (je-li nastavitelné) v jeho zcela zadní poloze (s výjimkou podběhů).

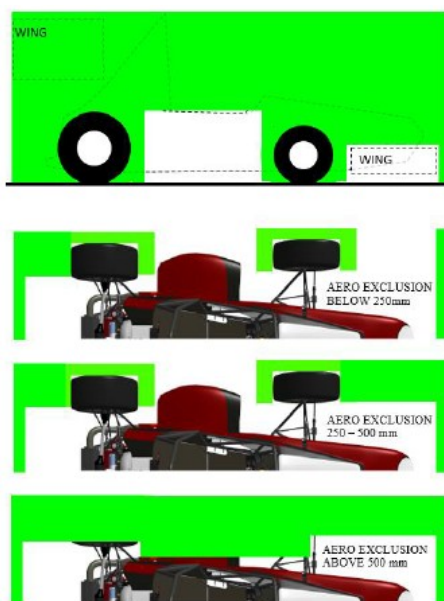
- c. Nástup dvou svislých rovin rovnoběžných se střednicí podvozku dotýkajícího se vnitřku zadních pneumatik ve výšce střednice náboje.

T.9.4.2 Žádná část aerodynamického zařízení nesmí být vyšší než 1,2 metru nad vozovkou při měření bez řidiče ve vozidle.

T.9.5 Prostor mezi koly

T.9.5.1 Mezi středy přední a zadní nápravy kola může aerodynamický přístroj rozšířit výstup v plánovacím pohledu na čáru taženou spojující vnější plochy předních a zadních pneumatik ve výšce kolových středů.

T.9.5.2 S výjimkou povolených podle bodu T.9.4.1 nesmí žádná aerodynamická zařízení nebo jiná karoserie umístěná mezi příčnými svislými rovinami umístěnými na přední a zadní nápravě překročit při měření bez řidiče ve vozidle výšku 500 mm nad vozovkou.



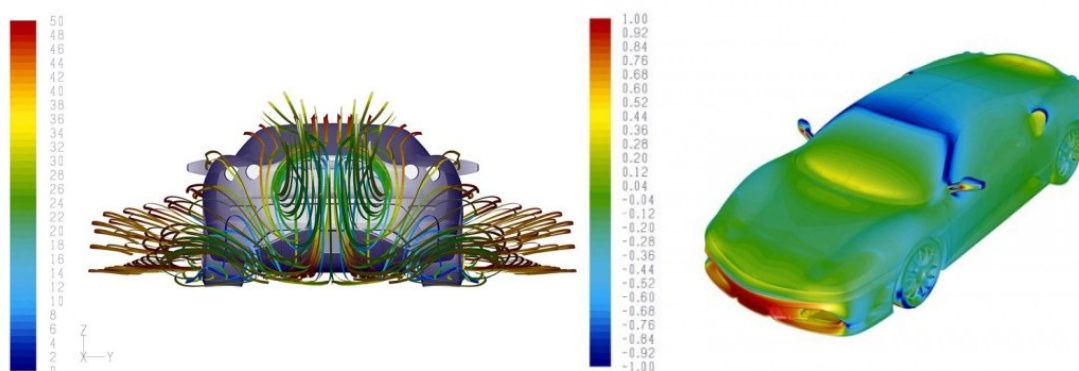
Obrázek 2.2 - Prostor vymezený pro umístění aerodynamických zařízení [4].

2.3 Elektrická výbava

- T.11.1.1** Všechny baterie a nízkonapětové zdroje musí být bezpečně upevněny k rámu vozidla.
- T.11.1.2** Všechny nízkonapětové baterie musí mít nadproudovou ochranu, která se pohybuje při maximálním předepsaném výtoku článků nebo pod ním.
- T.11.1.3** Zařízení podléhající zahříváním musí být tepelně izolovány.
- T.11.1.4** Jakákoli baterie na mokré články umístěná v prostoru řidiče musí být uzavřena v nevodivém krytu nebo rovnocenném obalu.

3 Aerodynamika a její vliv na jízdu

Při jízdě vozidla dochází k obtékání vzduchu kolem karoserie a zespodu vozidla, tím vzniká vzdušný odpor. Vozidlo způsobuje na některých částech obtékání časově proměnlivé, po jisté době periodické. Řešení obtékání těles je proto analytickými metodami obtížné a jsou zajímavé spíše z hlediska teoretického [1].



Obrázek 3.0 - Tvar proudnic a tlakové pole modelu Ferrari [7].

3.1 Základní pojmy

Proudnice

Proudnice je křivka v proudu, ke které je vektor rychlosti vždy tečný. Můžeme si ji představit jako dráhu, kterou opíše částice při průletu kolem tělesa. Sousední proudnice se neprotínají ani nijak nekříží, povrchové proudnice svazku znázorňují proudovou trubici. Proudová trubice znázorňuje chování potrubí s proměnlivým průřezem, má formální výhodu, že nemůže být přetlakem ani podtlakem roztrženo, zmíněná vlastnost vychází z definice proudnice. V ustáleném proudění se částice pohybují přesně podél proudnice. V neustáleném proudění je proudnici skoro nemožné zobrazit [1].

Pro ustálené proudění platí rovnice kontinuity a Bernoulliho rovnice.

Rovnice kontinuity:

$$\rho \cdot V \cdot S = konst \quad (3.1-1)$$

kde: ρ ... hustota média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

V ... rychlost proudění média [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

S ... plocha kolmá na vektor rychlosti [m^2].

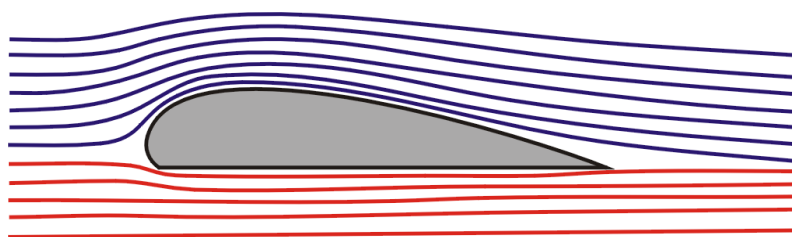
Bernoulliho rovnice:

$$\frac{\rho \cdot V^2}{2} + p = konst \quad (3.1-2)$$

kde: ρ ... hustota média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

V ... rychlost proudění média [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

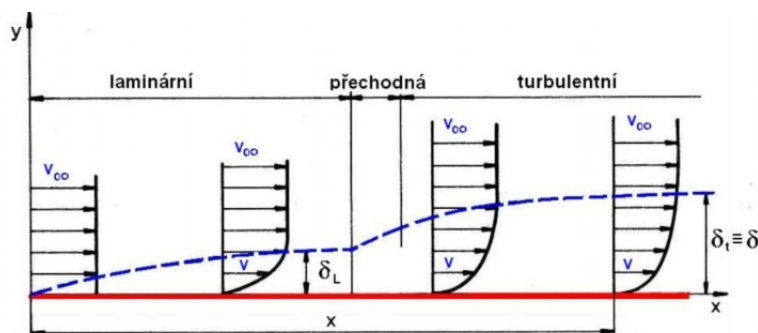
p ... tlak [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$].



Obrázek 3.1 - Tvar proudnice při obtékání profilu [1].

Mezní vrstva

Částice ulpívající při proudění média na povrchu mají nulovou rychlost, v blízkosti povrchu jsou bržděny pomalejšími částicemi u obtékaného povrchu. Oblast v nejtěsnější blízkosti k povrchu, kde dochází ke změně rychlosti proudících částic, se nazývá mezní vrstva. Mezní vrstva po proudu stále narůstá díky vstupujícím částicím tekutiny [2].



Obrázek 3.2 - Schéma vývoje mezní vrstvy na rovině desce [2].

Laminární a turbulentní mezní vrstva

Pozorování a pokusy ukázaly, že při nižších Reynoldsových číslech vzniká mezní vrstva laminární a mezní vrstva turbulentní. Laminární vrstva díky své vnitřní nestabilitě po překročení daného Reynoldsového čísla sama přejde přes přechodnou mezní vrstvu do turbulentní mezní vrstvy, zabránit přechodu je téměř nemožné bez použití vnější energie [1].

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina určující vliv vnitřního tření v důsledku viskozity dané kapaliny při proudění [5]

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (3.1-3)$$

kde: V ... střední hodnota rychlosti proudění kapaliny v daném průřezu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

d ... průměr trubice [m]

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

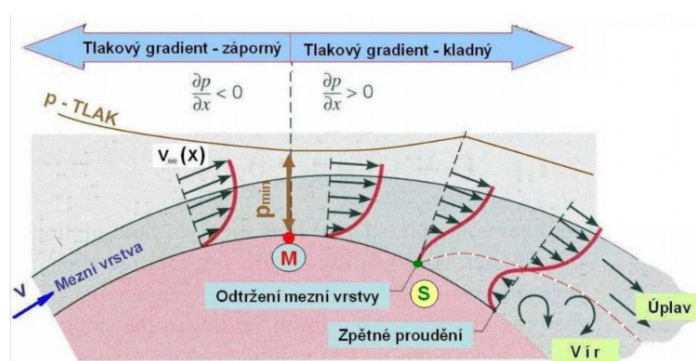
Není-li nabíhací proud turbulentní, vzniká na začátku desky laminární vrstva, která přechází v mezní vrstvu turbulentní s laminární pod vrstvou pro $Re_x = 100\,000$. Je-li nabíhající proud turbulentní, potom laminární vrstva na začátku desky nevzniká a turbulentní mezní vrstva se může nastavit od náběžného bodu [2].

Odtržení proudu

K odtržení mezní vrstvy dochází u těles zaoblených (koule, válec, letecký profil apod.), kde dochází k změně tlaku na povrchu tělesa. Při obtékání se tlak zmenšuje a v určitém bodě, jehož poloha je závislá na tvaru profilu, tlak začne stoupat a rychlost proudění částic uvnitř mezní vrstvy se zmenšuje.

V oblasti zvyšujícího tlaku jsou částice vnitřním třením zpomalovány, profil mezní vrstvy se deformuje na základě klesající rychlosti, která způsobí kolmý rychlostní profil na povrch. V tomto okamžiku došlo k zastavení částic tekutiny. Následuje účinek kladného tlakového gradientu ve směru proti smyslu stěny při styku se základním proudem, což vede k odtržení mezní vrstvy [2].

V části s vysokou turbulentní a nízkou rychlostí proudění vzniká oblast podobná úplavu. Na základě polohy odtržení a následné šířky úplavu vzniká odpor, dochází-li k odtržení na odtokové hraně nebo těsně před ní, vzniká malá úplavová šířka. Se zvětšujícím se úhlem náběhu se tvoří proudění do protitlaku. Posouvajícím se bodem odtržení od odtokové hrany směrem k náběžné narůstá tloušťka úplavu a odpor [1].



Obrázek 3.3 - Fáze odtrhu proudu [2].

3.2 Jízdní odpory

Jsou to síly, které působí proti pohybu vozidla. Odpor vzdušný a odpor valivý působí vždy proti pohybu. Při změně rychlostí musí vozidlo překonat odpor zrychlení a při jízdě do svahu odpor stoupání. Táhneme-li za vozidlem zapojený přívěs, pak musíme překonat odpor přívěsu [3].

Odpor vzdušný

Při jízdě vozidla dochází k obtékání vzduchu kolem karoserie a zespodu vozidla, proudnice se za vozem neuzavírají, dochází k vzniku víření a úplavu. Tím vzniká vzdušný odpor označovaný O_v . V celkovém odporu jsou zahrnuty i odpory, které vznikají při proudění vzduchu větracím a chladícím systémem, a vzdušné odpory vznikající díky rotujícímu pohybu kol. Velikost odporu závisí na výslednici normálových tlaků vzduchu na povrch vozidla a třecích sil působících v tečném směru proudění média kolem vozu [3].

Celkový vzdušný odpor lze určit ze vztahu:

$$O_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2 \quad [N] \quad (3.2-1)$$

kde: ρ ... hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

c_x ... součinitel odporu vzduchu vozidla [-]

S_x ... čelní plocha vozidla [m^2]

v ... rychlost vozidla [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Hodnota obsahu plochy S_x se získá z čelní projekce vozidla.

Součinitel odporu vzduchu c_x závisí na tvaru karoserie vozidla. Hodnoty se měří v aerodynamických tunelech a zpravidla nejvíc záleží na úhlu náběhu přední části vozidla. Vysoká hodnota součinitele vzdušného odporu znamená v praxi velkou spotřebu paliva, snížit odpor c_x lze díky vhodnému tvaru karoserie [3].

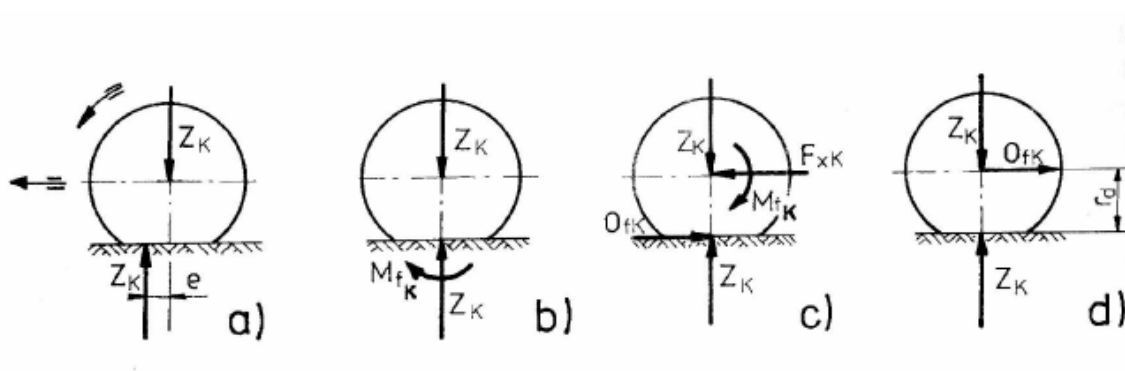
Stanovení součinitele odporu se v praxi měří v aerodynamických tunelech. K zviditelnění proudění se využívají dané metody, např. metoda kouře. Pro měření reakčních sil používá snímače síly, které jsou umístěny pod každé kolo zvlášť [2].

| Typ vozidla | $c_x [-]$ | $S_x [m^2]$ |
|-------------------------------|-------------|-------------|
| Osobní automobily | 0,3 - 0,4 | 1,6 - 2,0 |
| Sportovní vozidla | 0,3 - 0,35 | 1,3 - 1,6 |
| Závodní vozidla | 0,4 - 0,6 | 0,7 - 1,3 |
| Závodní vozidla - krytá kola | 0,25 - 0,35 | 0,8 - 1,5 |
| Nákladní vozidla - valník | 0,8 - 1,0 | 5-8 |
| Nákladní vozidla - s přívěsem | 1,0 - 1,2 | 5-8 |
| Autobusy | 0,5 - 0,7 | 5-7 |

Tab. 3.1 - Hodnoty vybraných vozidel. [3]

Odpor valivý

Odpor vzniká deformací pneumatiky a vozovky. Hovoříme-li o tuhé vozovce, pak vzniká deformace pouze pneumatiky. Ploše styku pneumatiky s vozovkou říkáme stopa. V přední části stopy ve směru jízdy dochází k stlačování obvodu pneumatiky a v zadní části se opět narovnává do původního tvaru. Z toho důvodu jsou měrné tlaky v přední části větší a výslednice elementárních sil Z_k je posunuta před svislou osu kola o hodnotu e [6].



Obrázek 3.2 - Valivý odpor kola [3].

Valivý odpor kola je:

$$O_{fk} = Z_k \frac{e}{r_d} = Z_k \cdot f_k \quad [N] \quad (3.2-2)$$

kde: Z_k ... radiální zatížení jednoho kola [N]

f_k ... součinitel valivého odporu [-]

e ... hodnota posunu [m]

r_d ... dynamický poloměr [m].

Za předpokladu jízdy po rovině se stejným součinitelem valivého odporu u všech čtyř kol můžeme napsat:

$$O_f = f \cdot G \quad [N] \quad (3.2-3)$$

kde: f ... součinitel valivého odporu [-]

G ... tíha vozidla [N].

Odpor stoupání

Odpor je podle vztahu (3.2-4) určen tíhovou složkou vozidla rovnoběžnou s povrchem vozovky [3].

$$O_s = \mp G \cdot \sin \alpha \quad [N] \quad (3.2-4)$$

kde: G ... tíha vozidla [N]

α ... úhel sklonu vozovky [°].

Znaménko plus v rovnici znamená stav pro stoupání, naopak znaménko mínus pro klesání. Odpor stoupání působí v těžišti vozidla.

Odpor zrychlení

Odpor zrychlení je síla, která při zrychlování vozidla působí proti jeho pohybu. [6]

Odpor zrychlení je určen vztahem:

$$O_z = \left(m + \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{di}^2} \right) \cdot a ; O_z = O_{zp} + O_{zr} [N] \quad (3.2-5)$$

kde: m ... okamžitá hmotnost vozidla [kg]

J_{ki} ... hmotnostní moment setrvačnosti dané rotující součásti [kg.m²]

r_{di} ... dynamický poloměr dané rotující součásti [m]

a ... zrychlení vozidla [m.s⁻²]

O_{zp} ... odpor zrychlení posuvné částí [N]

O_{zr} ... odpor zrychlení rotačních částí [N].

Odpor zrychlení posuvné části je určen vztahem:

$$O_{zp} = m \cdot a [N] \quad (3.2-6)$$

kde: m ... okamžitá hmotnost vozidla [kg]

a ... zrychlení vozidla [m.s⁻²].

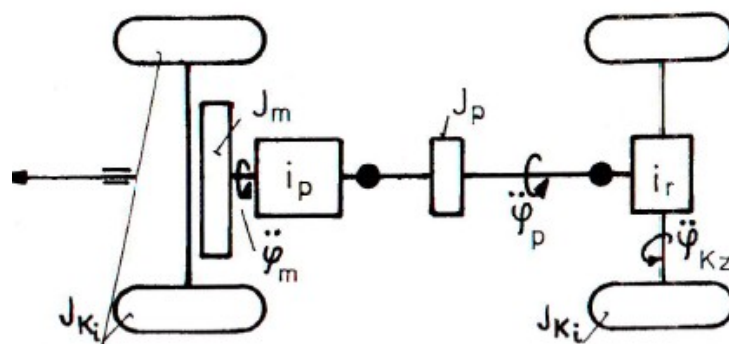
Odpor zrychlení rotujících částí je určen vztahem:

$$O_{zr} = \sum_i \frac{J_{ki}}{r_{di}^2} \cdot a [N] \quad (3.2-7)$$

kde: J_{ki} ... hmotnostní moment setrvačnosti dané rotující součásti [kg.m^2]

r_{di} ... dynamický poloměr dané rotující součásti [m]

a ... zrychlení vozidla [m.s^{-2}].



Obrázek 3.3 Schéma pohonného ústrojí automobilu [3].

3.3 Pohybová rovnice vozidel

Sečtením všech odporů určujeme potřebnou hnací sílu na kolech

$$F_k = O_f + O_v + O_s + O_z \quad [\text{N}] \quad (3.3-1)$$

kde: F_k ... potřebná hnací síla [N]

O_f ... odpor válení [N]

O_v ... odpor vzdušný [N]

O_s ... odpor sklonu [N]

O_z ... odpor zrychlení [N].

Po dosazení jednotlivých odporů:

$$F_k = fG + c_x \frac{\rho}{2} S_x v_r^2 + G \left(s + \vartheta \frac{a}{g} \right) \quad [N] \quad (3.3-2)$$

kde: ϑ ... součinitel vlivu rotačních částí [-]

s ... stoupání vozovky [-].

Výkon, který pak musí být přiváděn na kola vozidla, je roven:

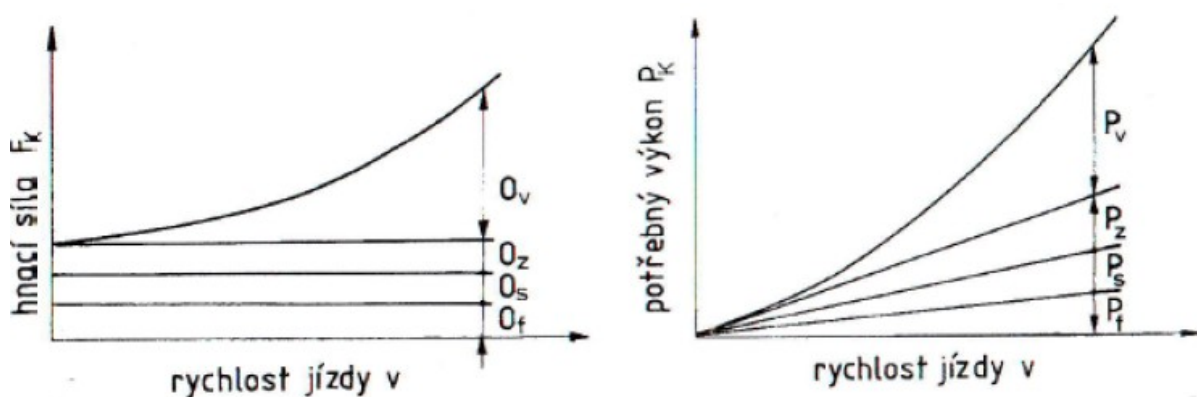
$$P_K = F_K \cdot v = \frac{M_K}{r_d} \cdot v \quad [W] \quad (3.3-3)$$

kde: P_K ... výkon přivedený na kola vozidla [W]

M_K ...točivý moment přivedený na kolo [N·m]

r_d ... dynamický poloměr kola [m]

v ... rychlost vozidla [$m \cdot s^{-1}$].



Obrázek 3.4 - Vliv vozidlových odporů na rychlosti jízdy a potřebného výkonu na rychlosti jízdy [3].

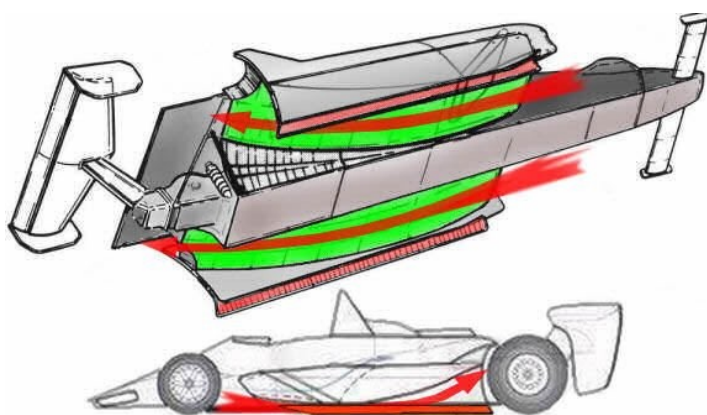
4 Rešerše aktivní aerodynamiky

Aktivním využíváním obtékaného vzduchu lze nejen zvýšit přítlak, ale také například efektivně chladit pohonné ústrojí. V dnešní době se aktivní aerodynamika používá na pro zlepšení dynamických vlastností.

4.1 Historie aerodynamiky v motorsportu

Roku 1968 byly použity první přitlačná křídla, která znamenala revoluci v motorsportu. Vývoj prvků přispívající k zvýšení přítlaku probíhal stylem pokus - omyl, přitlačné síly nebyly přesně kalkulovány, kvůli svému nevhodnému umístění vysoko nad monopostem docházelo k značným deformacím, které vedly až k úplné deformaci nosných prvků křídel a následné úplné ztrátě křídel. Colin Chapman roku 1972 určil směr vývoje monopostů, když ukázal Lotus 72 s křídly připevněny přímo na karoserii a optimální pozici výbavy pohonného ústrojí, díky kterému se optimalizovala poloha těžiště [10].

Roku 1981 se začíná objevovat na prvních monopostech F1 aerodynamicky tvarované podvozky pro generaci tzv. ground effectu. Tyto podvozky měly velkou výhodu v rovnoměrně generovaném přítlaku na závodní vozidlo [10].



Obrázek 4.0 - Konstrukce podvozku umožňující tzv. "ground effect" [8].

Aerodynamika se definitivně stala ústředním tématem vývoje formule 1 od roku 1990. Tohoto roku se na vozech začínají objevovat aktivní podvozky, které díky svým pracovním pozicím vedly k optimalizaci proudění média. Od roku 1998 organizace FIA z bezpečnostních důvodů minimalizuje možnosti vývoje prvků a zařízení generující přítlak [10].

4.2 Aerodynamika dnes

Formule 1 čelí velké výzvě každý závod. Problematika aerodynamiky nemůže být vyřešena korektně vždy nastavením generující maximální přítlak. Neexistuje jedno nastavení poloh přítláčných křídel, které funguje na každé závodní trati. Hlavním cílem je vyhledat optimální řešení pro každou individuální situaci. Aerodynamické tvary jsou optimalizovány k dokonalosti v PC softwaru, větrných tunelech a na trati. Ve větrných tunelech se proud vzduchu dělá viditelným díky laserové technologii, která přispívá k efektivní optimalizaci tvarů.

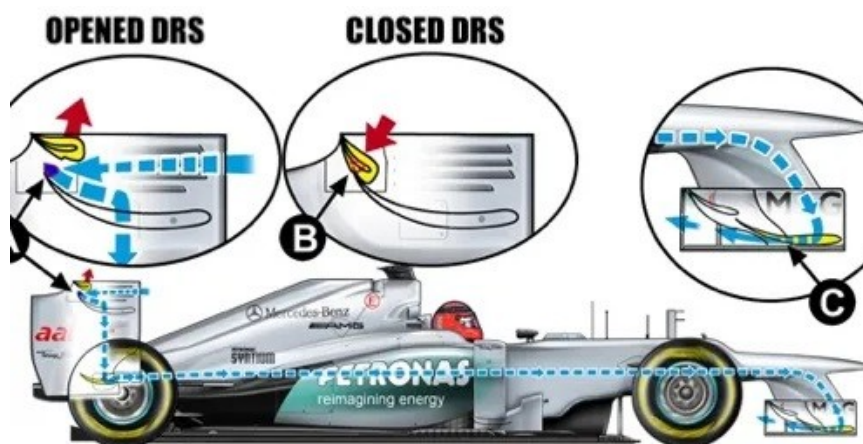
Systém DRS

"Drag Reduction System" je systém pro snížení odporu vzduchu zadního přítláčného křídla. Tento systém je určen pro snadnější předjíždění. V závodech se smí používat pouze na vymezených místech daných tratí.

Systém lze aktivovat pouze pokud vozidlo následuje soupeře s nižší než jednosekundovou ztrátou. Použití je umožněno automaticky díky systému monitorující polohu vozidla na trati. Při stisknutí aktivačního prvku dojde k otevření elektrohydraulického ventilu, který umožní zvednutí klapky zadního křídla. Ukončit působení DRS efektu lze dvěma způsoby. Pilot může ovládací prvek stisknout podruhé, čímž dojde k vypnutí systému a nebo může systém nechat vypnout automatickým způsobem. Automatický systém vypnutí DRS se aktivuje, pokud je zaznamenán brzdový tlak. Při zavírání je důležité, aby se proudění co nejrychleji vrátilo do pozice pro vysoký přítlak. Toto vrácení proudění má občas zpoždění, proto pilot může být vystaven situaci, kdy prudce brzdí s významně sníženým přítlakem [11].

Při vyhodnocení jakékoliv poruchy na zařízení zůstává ovládaná klapka křídla v poloze pro vyšší přítlak.

Když při kvalifikačních jízdách byl systém volně využíván, piloti dosahovali nižšího času na kolo průměrně o více než sekundu. Maximální rychlost při aktivním systému DRS stoupá o 16 až 20 km.h⁻¹ [11].



Obrázek 4.1 - Systém DRS [9].

4.3 Aerodynamické prvky a zařízení

V dnešní době si lze všimnout výrazného využívání obtékajícího vzduchu u elektrovozidel, kde je kladen důraz na optimalizaci odporové síly, a na sportovních vozidlech za cílem generace maximálního přitlaku při vysokých rychlostech a optimálního přitlaku. Nejčastěji používaná je technologie proměnného obtékání vzduchu v zadní části vozu, kterou realizuje proměnná pozice zadního přitlačného křídla dle dosažené rychlosti, respektive při brzdění.



Obrázek 4.2 - Obtékání vzduchu kolem zadního křídla [9].

Pagani Huayra

Vozidlo značky Pagani, s modelovým označením Huayra, je díky své aktivní aerodynamice schopno měnit výšku přední části od vozovky a nezávisle obsluhovat čtyři klapky umístěné ve své zadní a přední části. Pohyb klapky je řízen řídicí jednotkou, která je řízená informacemi ze systémů ABS a ECU, které předávají informace o rychlosti vozu, bočním zrychlení, úhlu řízení a poloze plynu. To je určeno k dosažení maximálního přítlaku v závislosti na situaci. Zadní klapky působí také jako vzduchová brzda.



Obrázek 4.3 - Aktivní aerodynamika automobilky Pagani [10].

5 Návrh vlastního technického řešení

Kapitolu vlastního návrhu technického řešení lze rozdělit do třech částí. V první části jsou popsány řešení, kterými lze ovládat pohyb aerodynamických zařízení. Druhá část je věnovaná popisu principu funkce a popisu použitých komponent pro vybraný způsob ovládání. Třetí část kapitoly obsahuje výpočet zatěžující síly na daný profil křídla, výpočet potřebného momentu pro pohyb s profilem křídla a výpočet minimálních rozměrů pro uložení křídla.

5.1 Varianty řešení ovládání aerodynamických zařízení

Dle rešerše aktuálně využívaných systémů lze aerodynamická zařízení ovládat způsoby:

Hydraulika

Hydraulická varianta využívá k ovládání profilu křídla stlačenou kapalinu. Celek je tvořen vyrovnávací nádobkou pro kapalinu, stlačovacího pístu a reakčního členu ukotveného ke křídlu. Pozice stlačovacího pístu ve vozidle je individuální. Princip funkce je totožný s principem funkce hydraulického zvedáku, kde pracovním médiem je kapalina v uzavřeném prostoru a přenos ovládací síly probíhá přes 2 pracovní písty.

Krokové motory

Pohyb křídla je realizován krokovými motory, které jsou řízeny pokyny z řídicí jednotky. Tato varianta je nejpoužívanější v oblasti osobních vozidel pro ovládání daných aerodynamických zařízení umožňujících požadované proudění vzduchu.

Servomotor

Pohyb křídla je realizován servomotorem umístěným v dané pohyblivé části křídla nebo na bočnici křídla.

Stlačený vzduch

Pohyb křídla je realizován systémem využívajícím stlačený vzduch. Tento systém využívá zásobníku stlačeného vzduchu a členu, který při spuštění otevírá vzduchový obvod a následně tlak ve vzduchovém potrubí vytlačuje reakční člen, který je pevně spojen s křídlem.

5.2 Výběr varianty

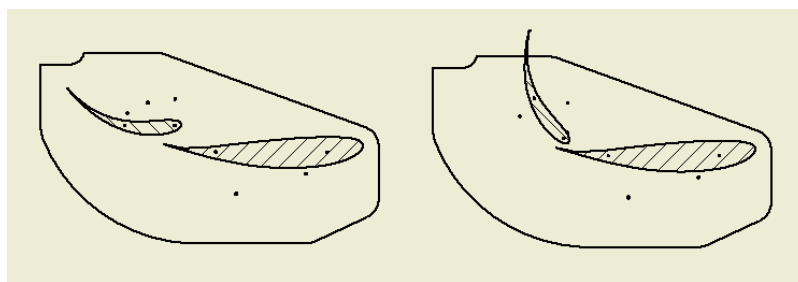
Výběr použité varianty řešení je proveden na základě porovnání výhod a nevýhod všech zmíněných variant.

| | | |
|------------------------|---|---|
| Hydraulika | + | Způsob nemusí být závislý na elektrickém zdroji. |
| | - | Vyšší četnost komponentů, možnost únik kapaliny. |
| Krokové motory | + | Neomezené nastavení rozsahu úhlu naklápění součástí. |
| | - | Konstrukčně náročné řešení. |
| Servomotor | + | Nízká hmotnost komponentů. |
| | - | Nízký výkon servomotorů. |
| Stlačený vzduch | + | Nezávislost na elektrickém zdroji. |
| | - | Možnost ztráty tlaku ve vedení z důvodu netěsnosti. |

Tabulka 5.0 - Porovnání výhod a nevýhod daných variant řešení aktivní aerodynamiky.

Po zvážení výhod a nevýhod variant technických řešení volím variantu servomotoru se servomotorem generujícím rotační pohyb uložený přímo v části profilu křídla z důvodu nízké hmotnosti komponentu, cenově dostupných komponentů na trhu a nízké konstrukční náročnosti.

Na formuli bude ovládaná pouze jedna zadní příčka křídla, která díky servomotoru může mít maximální rozsah úhlu otáčení $0^\circ - 90^\circ$. Změnou úhlu profilu křídla dojde ke změně obtékání vzduchu kolem profilu. Pracovní úhel profilu křídla je znázorněn na Obrázku 5.0 kde vlevo je znázorněna poloha 0° a vpravo poloha 90° .

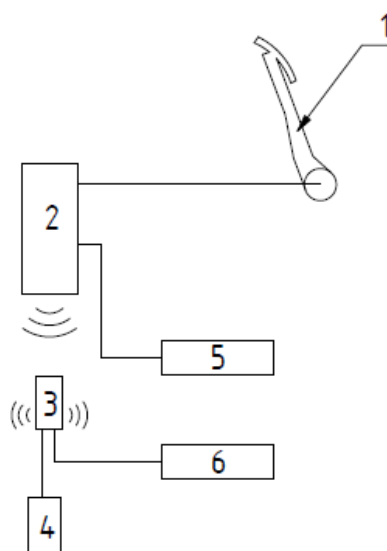


Obrázek 5.0 - Pracovní polohy profilu křídla.

5.3 Popis komponentů a funkce systému

Systém je složen z šesti základních komponentů. Akční člen, ovládaný pilotem, svým pohybem dává signál vysílači. Vysílač na dálku předá rádiový signál přijímači. Přijímač ovládá servomotor uložený v profilu křídla.

Pohybem servomotoru vzniká rotační pohyb dané součásti. Maximální rozsah úhlu je závislý na rozsahu úhlu daného vybraného servomotoru. Servomotor je spojen elektrickým vedením s přijímačem. Rozměry servomotoru jsou limitovány velikostí profilu křídla, do kterého se servomotor bude instalovat. Elektrický zdroj soustavy musí být umístěn dle pravidel FSAE.



Obrázek 5.1 - Blokové schéma s legendou. 1 - akční člen, 2 - vysílač, 3 - přijímač, 4 - reakční člen, 5 - zdroj vysílače, 6 - zdroj přijímače.

Vysílač a přijímač:

Čtyřkanálová souprava pracující v pásmu 2,4 GHz. Napájecí napětí vysílače 4,8 až 6 V. Napájecí napětí přijímače: 4,8 až 7,4 V. Jako vysílací a přijímací zařízení lze použít i univerzální mikromoduly známé pod obchodním názvem RTX moduly. Všechna tato zařízení již obsahují kompletní algoritmus kódování.

Reakční člen:

Stejnoseměrný analogový servomotor pracovního napětí s rozsahem 4,8 až 7 V. Dominantním parametrem servomotoru je servomoment měřený při daném napětí.

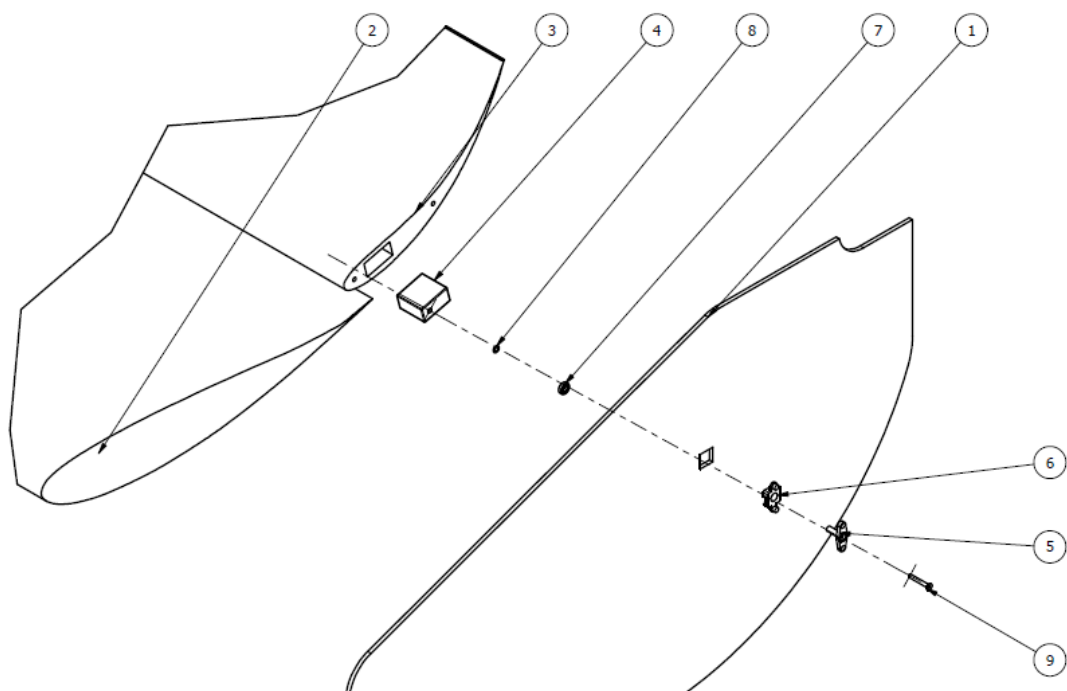
Zdroj přijímače:

Pohonný NiMH akumulátor dané voltáže a kapacity.

Výběr a detailnější specifikace komponentů je dána individualitou týmu, blíže specifikovaných požadavků na dané komponenty a nabídkou trhu.

5.4 Popis konstrukce

Pro umožnění rotačního pohybu profilu navrhuji konstrukci uložení křídla v pouzdrech. Pouzdro je upevněno k bočnici pomocí lepeného spoje, servomotory jsou uloženy v profilu křídla. V pouzdře je v ose rotace nalisováno ložisko, člen přenášející servomoment (vrtule) je upevněn šroubovým spojem.



Obrázek 5.2 - Montážní schéma systému. 1 - bočnice křídla, 2 - hlavní příčka, 3 - vrchní příčka, 4 - servomotor, 5 - vrtule, 6 - pouzdro, 7 - ložisko, 8 - podložka, 9 - lícovaný šroub

Pro stanovení minimálních potřebných rozměrů konstrukce potřebuji znát zatěžující sílu působící na profil křídla ve svislé poloze. Ze získané síly budu počítat potřebný servomoment motoru a namáhání vybraných prvků konstrukce na stříh a otláčení, z kterých budu stanovovat minimální hodnoty pro šroub uložení a šířku pouzdra. Počítané hodnoty jsou znázorněny v obrázku 5.9.

5.5 Výpočet zatěžující síly

K výpočtu zatěžující síly profilu křídla budu potřebovat znát odporový koeficient c_x . Hodnotu odporového koeficientu c_x jsem získal simulací v softwaru ANSYS.

V softwaru ANSYS jsem si vytvořil pracovní prostředí simulující obtékání profilu křídla danou rychlostí média.

Simulaci jsem provedl pro dvě různé pracovní polohy profilu křídla a tyto profily mezi sebou porovnal. Obsahy ploch jsem získal vymodelováním profilu v programu Autodesk Inventor, a jejich průmětů do roviny.

Vstupní hodnoty pro výpočet zatěžující síly jsem zaznamenal do níže uvedených tabulek, kde poslední hodnota ($F[N]$), je hodnota získaná simulací v softwaru.

| | |
|--------------------------------------|------------|
| Poloha | 0 |
| v [m.s-1] | 20 |
| ρ [kg.m⁻³] | 1,25 |
| S_x [m²] | 2.10-5 |
| F [N] | 0,00413963 |

Tabulka 5.1 - Hodnoty pro polohu 0°

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| Poloha | 90 |
| v [m.s-1] | 20 |
| ρ [kg.m⁻³] | 1,25 |
| S_x [m²] | 1.10-4 |
| F [N] | 0,0469472 |

Tabulka 5.2 - Hodnoty pro polohu 90°

Úpravou vzorce (3.2-1) dostanu vztah pro odporový koeficient c_x :

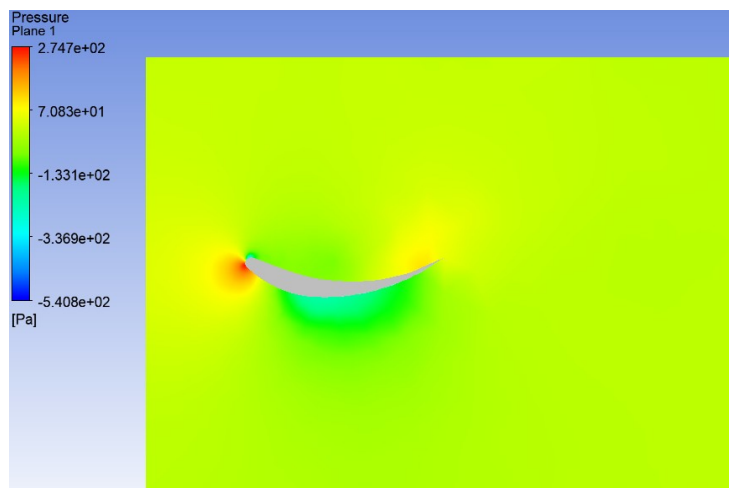
$$c_x = \frac{2F}{\rho \cdot S_x \cdot v^2} \quad [-]$$

Po dosazení vstupních hodnot z tabulek 5.0 a 5.1 dostáváme pro 2 různé polohy odporové koeficienty:

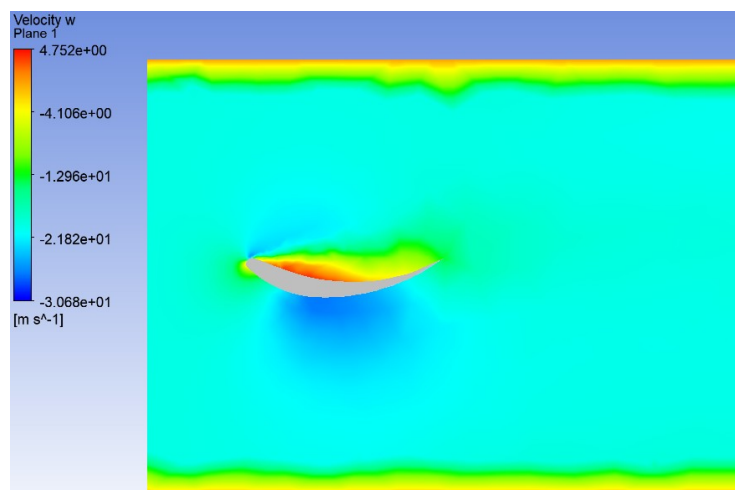
| | |
|--------------------------------|-------|
| c_{x0} [-] | 0,827 |
|--------------------------------|-------|

| | |
|---------------------------------|-------|
| c_{x90} [-] | 1,877 |
|---------------------------------|-------|

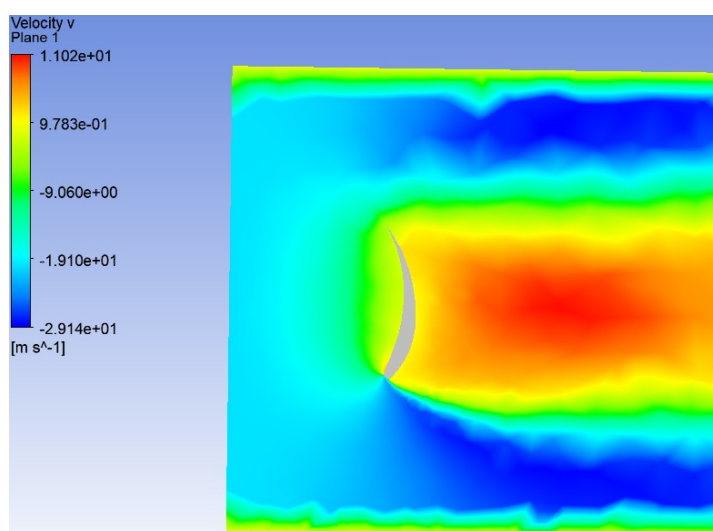
Na následujících snímcích ze simulaci v softwaru ANSYS si lze všimnout rozdílu proudění vzduchu kolem profilu ve dvou různých polohách. Vysoká hodnota odporového koeficientu ve svislé poloze je dána větší čelní plochou S_x a větším tlakem, který působí na čelní nárazovou plochu profilu ve svislé poloze.



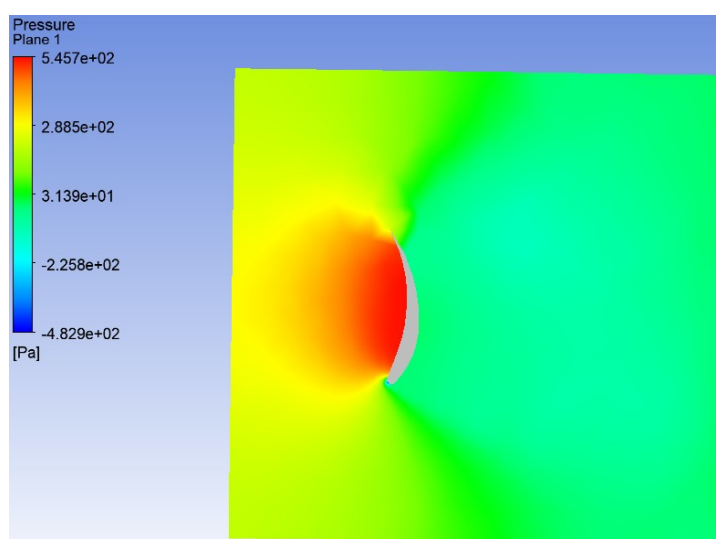
Obrázek 5.2 - Působení tlaku na profil 0°.



Obrázek 5.3 - Působení rychlosti na profil v poloze 0°.



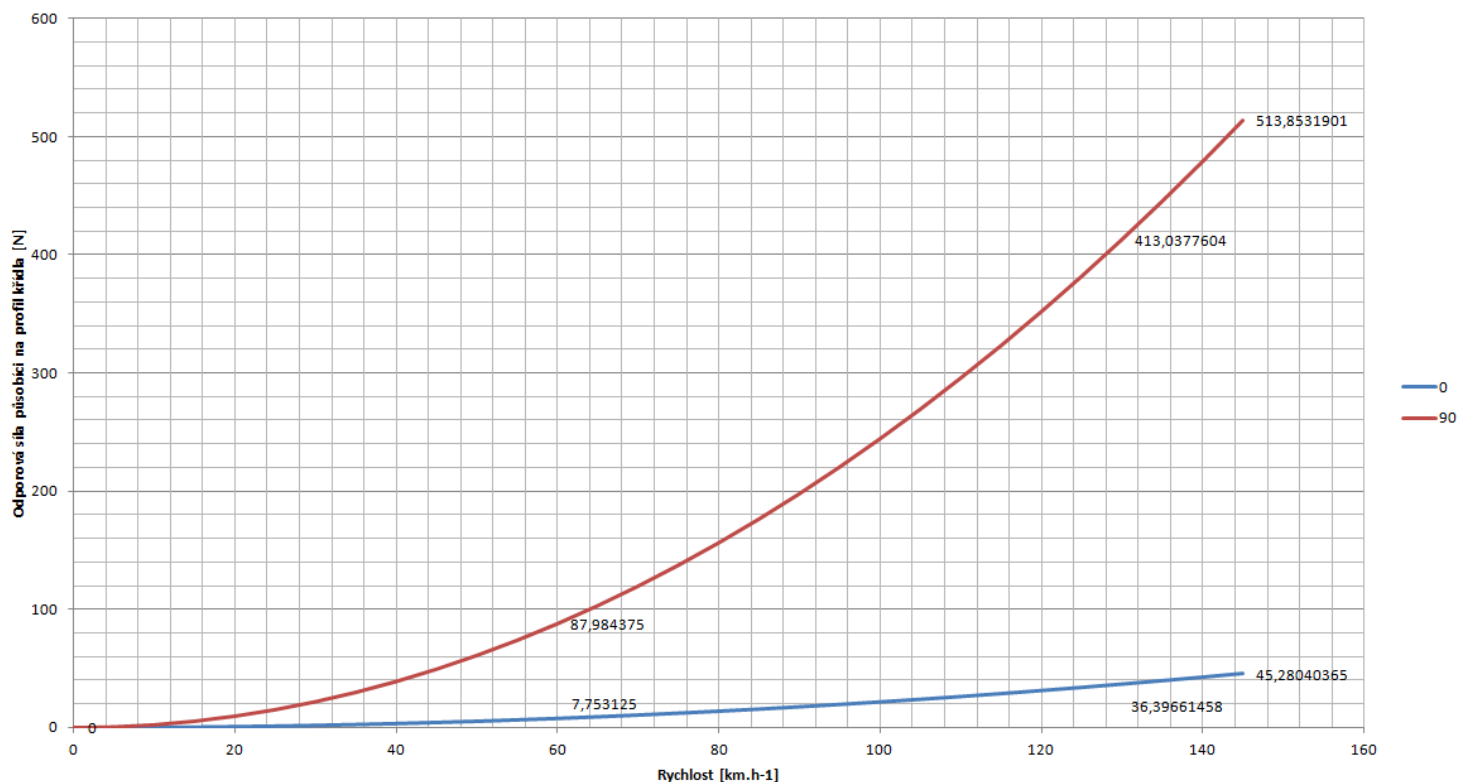
Obrázek 5.4 - působení rychlosti na profil v poloze 90°.



Obrázek 5.5 - Působení tlaku na profil v poloze 90°.

Následný uvedený graf zobrazuje rozdíl mezi pracovními polohami profilu v závislosti na odporové síle působící na křídlo a rychlosti. Sledované rychlosti jsou: 60 km.h⁻¹, 130 km.h⁻¹ a 145 km.h⁻¹

V grafu jsem vyznačil dvě situace znázorňující dané pracovní polohy profilu křídla, kde na ose x je vynesena rychlost vozidla a na ose y je vynesena síla působící na profil křídla ve směru jízdy vozidla.



Obrázek 5.6 - Znázornění působení zatěžující síly na profil křídla.

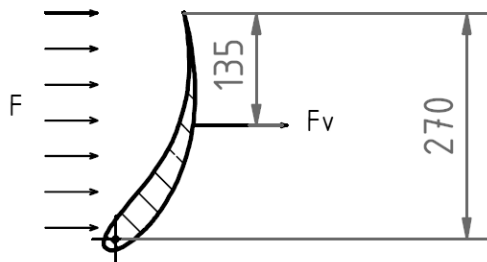
5.6 Výpočet momentu působící na profil křídla

Při výpočtu momentu zatěžujícího profil křídla budu vycházet ze síly, která působí na profil křídla při rychlosti 130 km.h⁻¹. Pro výpočet budu volit hodnoty, které odpovídají stavu, kdy je profil křídla ve svislé poloze.

Ve svislé poloze je vzdálenost od osy rotace k nejvyššímu bodu profilu křídla 270 mm. Uvažuji, že výsledná síla působí ve středu čelní plochy, proto volím rameno délky 135 mm.

Výsledný moment budu počítat k ose rotace. Rozměry jsou odečteny z výkresové dokumentace profilu křídla.

Hodnota zatěžující síly profilu křídla ve svislé poloze při rychlosti 130 km.h⁻¹ činí 413,03N.



Obrázek 5.7 - Nákres profilu křídla v bokorysu.

Výpočet momentu z momentové rovnice:

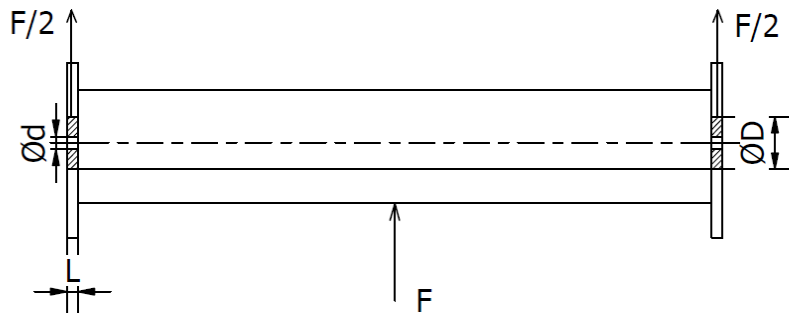
$$M = F_v \cdot r = 413,03 \cdot 0,135 = 55,76 \text{ Nm}$$

5.7 Kontrola na smyk a otláčení

Rotační část bude uložena v pouzdrech umístěných v bočnicích křídla. Jako vstupní hodnoty volím reakce vzniklé působením zatěžující síly na profil křídla. Spojovací materiál volím lícovaný šroub pevnostní třídy 5.6, materiál pouzdra a vrtule volím ocel 11600. Pro zjednodušení výpočtu budu uvažovat materiál bočnic ocel 11600.

| Pevnostní údaje | 11600 | 5.6 |
|--|-------|-----|
| Mez kluzu R_e [MPa] | 300 | 300 |
| Dovolené napětí ve smyku τ_{DS} [MPa] | 180 | 180 |
| Dovolený tlak v stykových plochách p_d [MPa] | 40 | 40 |

Tabulka 5.7 - Pevnostní hodnoty daných materiálů.



Obrázek 5.8 - Znázornění zatěžující síly F a jejich reakce v náryse přitlačného křídla.

Kontrola smykového napětí lícovaného šroubu.

Z pevnostní rovnice určím průřezovou plochu šroubu:

$$\tau = \frac{F}{2S} \leq \tau_{DS} [MPa]$$

$$S = \frac{F}{2 \cdot \tau_{DS}} = \frac{413,03}{2 \cdot 180} = 1,15 \text{ mm}^2$$

Z obsahu kruhu určím průměr šroubu:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} [mm^2]$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,15}{\pi}} = 1,2 \text{ mm}$$

Výpočet bezpečnosti:

$$k = \frac{\tau}{\tau_{DS}} [-]$$

$$k = \frac{\frac{F}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}}{\tau_{DS}} ; k = \frac{\frac{413,03}{2 \cdot \frac{\pi \cdot 1,2^2}{4}}}{180} ; k = 1$$

kde: F ... síla zatěžující profil křídla [N]

S ... obsah kruhové plochy dříku šroubu [m^2]

τ ... tečné napětí [Pa]

τ_{DS} ... dovolené tečné napětí [Pa]

d ... průměr dříku šroubu [m]

Průměr lícovaného šroubu volím $d = 4 \text{ mm}$.

Kontrola na otlačení:

$$p = \frac{F}{S_p} \leq p_D [\text{MPa}]$$

$$p_D = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot L}$$

Z rovnice vyjádřím hledanou neznámou L :

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot p_D} ; L = \frac{413,03}{\pi \cdot 4 \cdot 40} ; L = 0,8 \text{ mm}.$$

Minimální délku pouzdra volím $L = 0,8 \text{ mm}$.

Výpočet bezpečnosti:

$$k = \frac{p}{p_D} [-]$$

$$k = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot L} ; k = \frac{413,03}{\pi \cdot 4 \cdot 0,8} ; k = 1$$

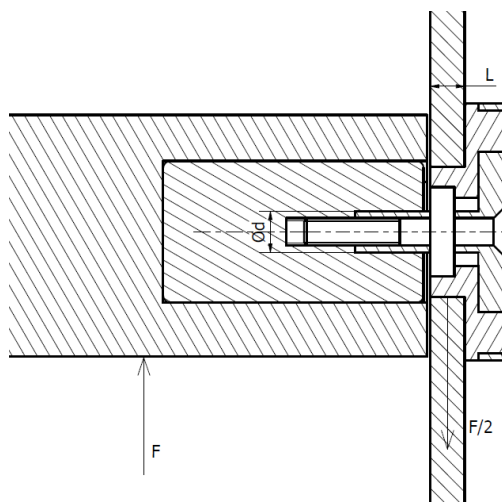
kde: F ... síla zatěžující profil křídla [N]

p ... tlakové zatížení [Pa]

p_d ... dovolené tlakové zatížení [Pa]

L ... minimální délka pouzdra [m]

S_p ... otláčovaná plocha [m²].



Obrázek 5.9 - Znáznornění počítaných rozměrů.

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vybrat a navrhnout technické řešení aktivní aerodynamiky na studentském monopostu. Dle rozsáhlejší rešerše jsem zvolil variantu dálkově ovládaného servomotoru na principu rádiového řízení. Tato varianta umožňuje vykonávat řízený rotační pohyb kteréhokoliv vybraného aerodynamického prvku na vozidle. K dimenzování systému bylo potřeba zjistit zatížení profilu křídla v daných pracovních polohách. Díky softwaru ANSYS fluent jsem úspěšně vypočítal klíčové hodnoty pro výpočet potřebného servomomentu a pro pevnostní výpočet. Tento systém, díky kterému lze účinně měnit obtékání vzduchu kolem karoseri, lze použít i pro jiná vozidla. Pro zmenšení potřebného servomomentu doporučuji rozdělit daný ovládaný prvek na více částí. Před realizací doporučuji týmu VŠB-TU Ostrava přehodnotit klady a zápory této varianty .

Použitá literatura

- [1] BROŽ, Václav, Vladimír DANĚK, Karol FILAKOVSKÝ a Jaromír TEICHL. *Základy aerodynamiky: studijní modul 8*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. Učební texty dle předpisu JAR-66. ISBN 80-7204-316-1.
- [2] JANALÍK, Jaroslav. Obtékání a odpor těles [online]. Ostrava: VŠB-TU, 2008 [cit. 2014-01-05]. Dostupné z <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-Obtekani.pdf>
- [3] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory : hnací charakteristika : brzdění : odpruženost : řiditelnost, ovladatelnost : stabilita*. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [4] *Formula Student rules 2020* [online]. 2020 [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf
- [5] SLUNSKÝ, Michal. Aerodynamika vozidla . bakalářská práce. Ostrava : VŠB –Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2015, 51s. Vedoucí práce: Jablonská, J.
- [6] VLK, František. *Automobilová technická příručka*. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-9681-4.
- [7] *Ferrari 430 Scuderia* [online]. In: . [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/cars/ferrari/brutale/2008/2008-ferrari-430-scuderia-test/>
- [8] Ground effect. In: *Formula1* [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/ground_effect.html
- [9] *Aerodynamics: CFD and Windtunnel* [online]. In: . [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.presticebdt.com/aerodynamics-area-cfd-and-wind-tunnel-testing-in-motorsport/>
- [10] *History of Aerodynamics* [online]. 2003 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.flnetwork.net/main/s107/st22394.html>
- [11] *DRS* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: http://www.formula1-dictionary.net/drs_wing_rear_movable.html

Seznam příloh

| | |
|-----------|-----------------|
| Příloha A | Sestavný výkres |
| Příloha B | Montážní výkres |
| Příloha C | Výkres pouzdra |
| Příloha D | Výkres vrtule |
| Příloha E | Schéma systému |